

航空宇宙用先進複合材料

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ^{もりもと} 森本 ^{てつや} 哲也・^{あおき} 青木 ^{たくや} 卓哉

東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 教授 ^{おぎはら} 荻原 ^{しんじ} 慎二

1. はじめに

航空機は自らの重量のみならず、燃料や有償搭載物（ペイロード）を揚力で支えながら大気中を飛行します。そのため、温室効果ガスの一つである CO₂ の排出低減やペイロードの増大による経済性の改善には、機体構造の軽量化およびエンジンの高効率化による所要燃料の削減が不可欠です。そのため、単位重量あたりの強度（比強度）に優れた材料を用いた構造重量の削減や、耐熱性に優れた材料を用いるエンジン熱効率の向上が探求され続けています。

第二次世界大戦後にジェット旅客機が登場して以来、比強度に優れたアルミ合金で機体構造を構成し、ジェットエンジンの燃焼器やタービン等の高温部を耐熱性に優れたニッケル等の合金で構成する組み合わせが永らく支配的でした。しかし、我が国の企業が炭素繊維や炭化ケイ素 (SiC) 繊維を商業的に成立し得る規模で量産することに成功した結果、軽量の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) や耐熱セラミックス基複合材料 (CMC) 等の先進複合材料が実用化されています。しかし、新しい材料の登場に伴い、新たな課題も浮上しています【図 1】。

2. 金属—CFRP 接合体におけるガルバニック腐食

CFRP は金属材料に対して大幅に貴な電位を有して



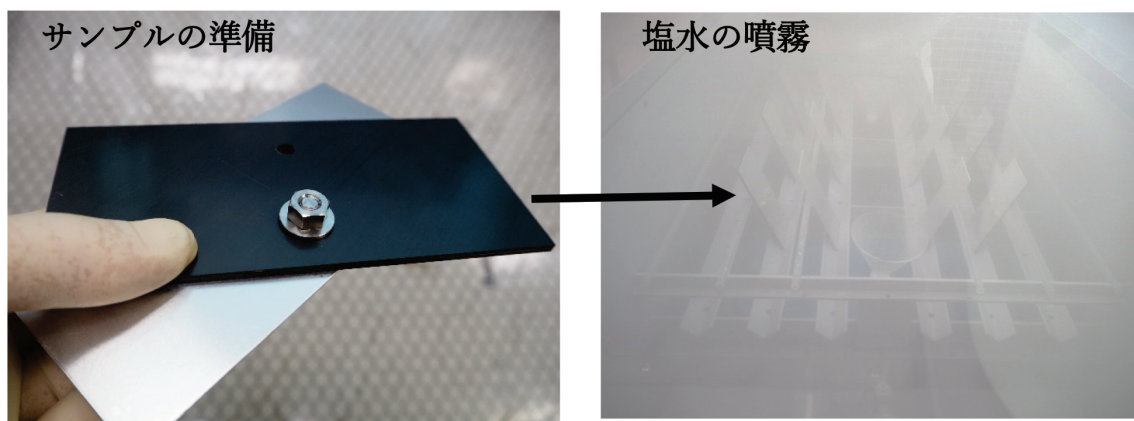
【図 1】 近未来旅客機イメージ
～CFRP や CMC の様な「先進複合材料」が使われます～

いるため、金属—CFRP 接合体において短絡させるとガルバノ電池が構成され、金属側が激しく腐食する「ガルバニック腐食」を発現することが懸念されます。もちろん、金属材料が接合する従来の構造と同様、適切な電氣的絶縁や酸素の遮断、あるいはコーキング処理や塗装による水分の排除等、防錆処理を厳格に施すことでガルバニック腐食を回避することは可能です。しかし、重量の増加やメンテナンスコストの増大を伴うため、CFRP の比強度や経済性の優位性が損なわれてしまいます。加えて、航空機構造における金属—CFRP 接合体では、一旦腐食が発生した場合におけるリスクが極めて重篤であるため、あらかじめ入念な試験を行い、どのような防錆処理を選択することが最善であるのか確認しておく必要があります。しかし、ISO9227, ASTM-B117 等、既存の腐食試験規格では、単独の金属サンプルあるいは防錆処理を施された金属サンプルが想定されており、金属—CFRP 接合体における過酷なガルバニック腐食現象が想定されていなかったため、「金属—CFRP 接合体を想定したガルバニック腐食試験法」の規格化が急がれていました。

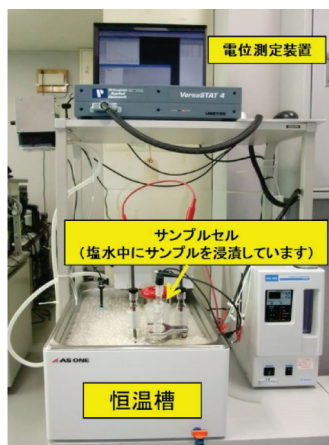
そこで我が国では、学識経験者や産業界から技術者を委員メンバーに募り、平成 28 年度より新たな ISO 試験規格案の整備を進め、経済産業省「エネルギー使用合理化国際標準化推進事業—炭素繊維強化プラスチックの試験方法」の枠組みにて「金属—CFRP 異種材料接合体分科会」を組織し、ISO への新規プロジェクト提案を行い、賛成多数による国際審議入りを経て、ISO-CD21746 として金属—CFRP 接合体のガルバニック腐食試験国際規格を成立させています。

2. 1. ガルバニック腐食抑制方法の探求

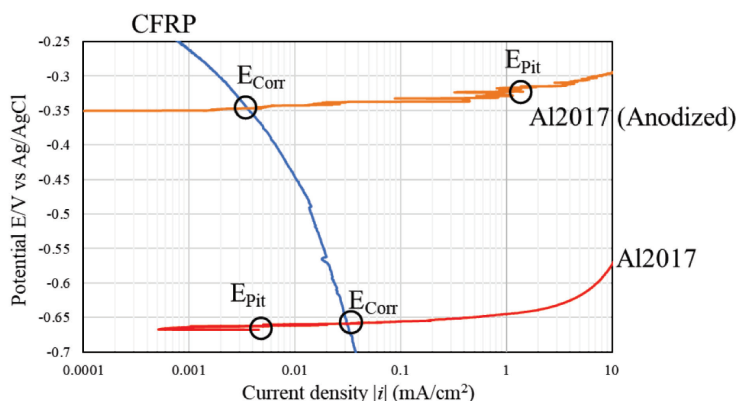
東京理科大学と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では共同研究を進め、陽極酸化処理層に腐食抑制剤 (インヒビター) を封入することによりガルバニック腐食を抑制することに成功し、電気化学的試験法を用いて実証しています。



【図2】ガルバニック腐食試験
～この例では、チタン合金とCFRPをボルト締結で短絡し、霧状の塩水を吹き付けて腐食させています～



【図3】電気化学試験
～サンプルと基準電極を塩水に浸漬して微弱な電位変化をモニタリングした一例です～



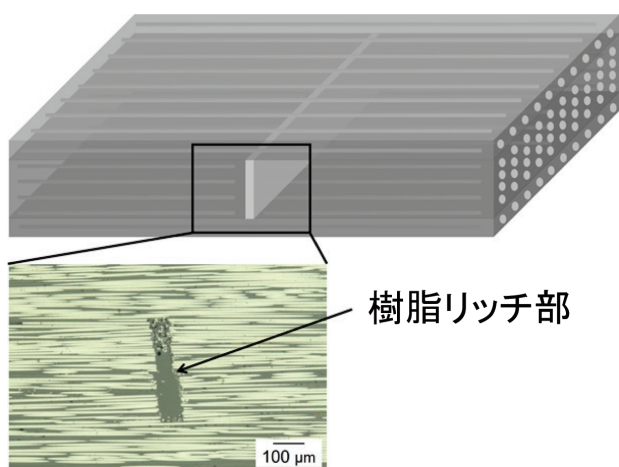
陽極酸化処理とは、電気分解時の陽極側で酸化皮膜が形成されることを利用して、化学的に安定かつ電気的に絶縁性が高い不動態皮膜を厚く設けて腐食の抑制を期待する手法です。

航空機で使用されるアルミ合金は、特別な指示がない限り ASTM B580, MIL-A8625F 等の規定に適合する皮膜を生成する陽極酸化処理が施されることとされています。しかし、航空機用リベット等に多用されている Al2017 合金等では、CFRP との自然電位の差が非常に大きく、電流が流れて陽極酸化皮膜を破壊してしまうため、ガルバニック腐食の抑制には不十分です。そこで本学と JAXA は、金属イオンと難溶解性の錯体を形成して金属表面を保護する有機系インヒビターの中から、化学プラントや排水パイプライン、熱交換器等過酷な腐食環境で実績のある 1,2,3-ベンゾトリアゾール (BTA) を選択し、皮膜にナノスケールの空隙を設けて封入処理を施す様に陽極酸化処理を工夫しました。この新しい皮膜を設けた Al2017 合金では CFRP との間で電流が流れず腐食が進行しないことが電気化学試験で確認されました【図2, 図3】。

3. 繊維不連続部を有する CFRP 積層板の破壊挙動の研究

次に、CFRP 積層板の破壊挙動に関する研究の紹介をします。前項でも取り上げた CFRP は直径 5 マイクロメートル程度の炭素繊維の束をプラスチックで固めた材料です。CFRP は繊維方向には変形への抵抗が大きく、また強いという性質を持ちますが、それ以外の方向には弱いという弱点があります。あらゆる方向の力に耐えるため、CFRP はプリプレグと呼ばれる繊維を一方方向にひきそろえた薄い板を繊維がいろいろな方向に配向されるように積層した積層板として用いられます。CFRP 積層板を航空機の機体のような複雑な構造に使用する場合、板厚を変化させるため、繊維不連続部が生じてしまい、そこが破壊の起点となってしまいます。【図4】には、繊維を切断したプリプレグを積層した CFRP 積層板の模式図と顕微鏡写真を示します。繊維不連続部にプラスチック（樹脂）が流れ込み樹脂リッチ部が形成されていることが分かります。

この CFRP 積層板に力を加え、変形や破壊の状態を



【図4】 繊維不連続部を有する炭素繊維強化プラスチック（CFRP）積層板の模式図と顕微鏡写真。繊維不連続部に樹脂リッチ部が形成されている。

調べた結果が【図5】です。X線CTによる観察を行うことで、樹脂リッチ部が破壊の起点となっていることが明らかになりました。すなわち、樹脂リッチ部でのクラックの発生とそこからの層間はく離の発生・進展を観察することができています。

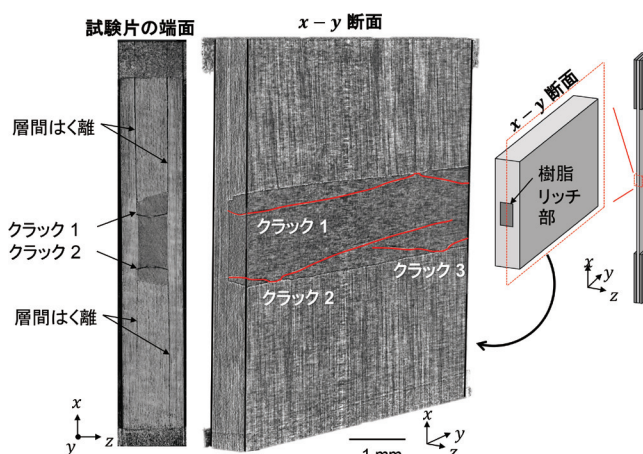
この研究では、応力解析と組み合わせることで、いつ（どの程度の力が働いたときに）、どこで（樹脂リッチ部内部か、樹脂リッチ部／CFRP界面か、CFRP層間か）、どのように破壊が進行するのか、を予測することができるようになってきました。

このように、航空機での実際の運用中に破壊を起こさせない設計をするために、どのような力が働いたときにいつどこが破壊するのかをあらかじめ知っておくことが重要なのです。

4. 耐熱セラミックス基複合材料（CMC）の研究開発状況

航空機エンジンの高効率化を目指して、燃焼ガスに晒され高温となる燃焼器、タービン部品の構成材料を現在のニッケル基耐熱合金からSiC繊維強化SiC複合材料などのセラミックス基複合材料（CMC; Ceramic Matrix Composites）に置き換える研究開発が米国、欧州、日本を中心に進められています。

SiC（炭化ケイ素）というセラミックスは軽量で耐熱性、高温耐酸化性に優れていますが、壊れやすい弱点があります。しかしながら、炭素繊維のように直径10 μm程度にまで細く作られたSiC繊維は強く大きく変形でき、破壊ひずみが大きい特長を持っています。そこでCFRPのように、SiC繊維を強化繊維とし、そ



【図5】 繊維不連続部を有するCFRP積層板の破壊状態の観察。X線CTによる観察で樹脂リッチ部のクラック発生とそこから進展する層間はく離の状況が観察される。

の周囲をSiCなどのセラミックスで固めた（マトリックス化した）複合材料、CMCが開発されています。

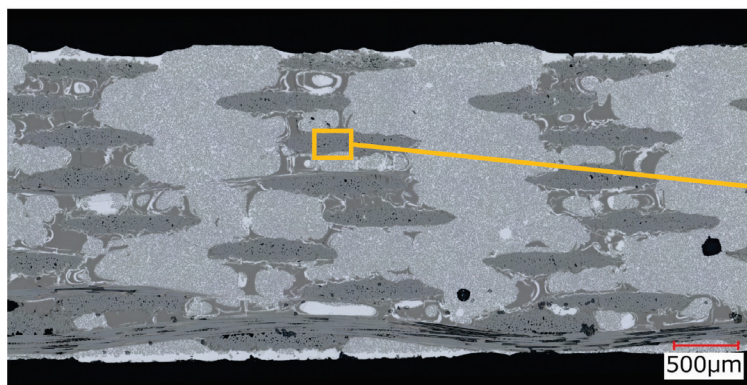
CMCでは強化繊維とマトリックスの接着を適度に弱める工夫がされています。このため、引張荷重下でもマトリックスには細かな割れ（微視クラック）が生じますが、繊維とマトリックスが容易に剥がれるため、マトリックスに生じたクラックは強化繊維を切断しにくく、更に力がかかった場合でも強化繊維が力を受け持つことが出来き、CMCは壊れにくい材料となります。

4. 1. 将来宇宙機の耐熱部材を想定したCMC材料研究

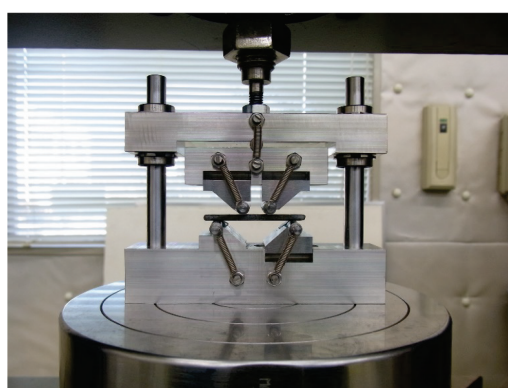
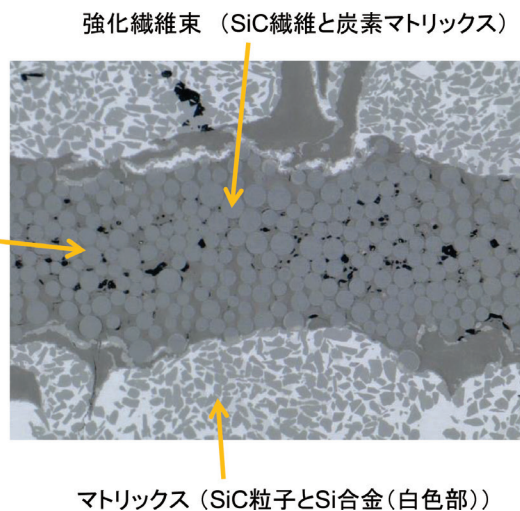
CMCは高い信頼性が要求される航空機用エンジン的高温部品としての利用が始まったところです。一方、米国で運用されていたスペースシャトルのように、大気圏に再突入する宇宙機においてもCMCを利用できる可能性があると考えられます。JAXAの予備検討では、非常に高温となる機首等を除くと、機体表面の大部分は表面温度が800℃以下と予想されており、中温域の機体外板としての軽量の耐熱構造材料が必要となっています。

そこで東京理科大学とJAXAが連携して将来の再突入宇宙機の中温部位（800℃以下）への適用を想定して、製造方法を含めたCMC材料の基礎研究を進めています。

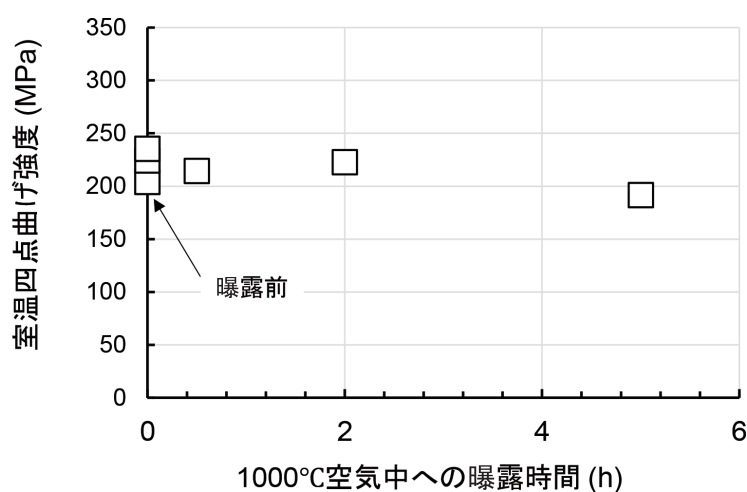
再突入宇宙機では、航空機エンジン用途と比べて大幅な低コスト化や大型部品の製造が必要となります。このため、1) 強化繊維は安価な汎用グレードSiC繊維



【図 6】 将来再突入機を想定して試作した CMC の断面組織



【図 7】 1000℃ 空气中曝露後の試作 CMC の残存曲げ強さ



維を採用する、2) SiC マトリックスの形成は高価な原料が必要で、特別な装置や形成に時間を要すること
も想定されます。このため安価なフェノール樹脂等の
原料を使用して、日本で工業化済みのプロセス（樹脂
含浸焼成法）によって SiC 繊維周囲に炭素マトリッ
クスを形成する、3) 最後に、炭素マトリックス形成後
の残存気孔と材料外表面に、耐酸化性に優れるシリコ
ン合金の融液を加熱炉で含浸、取り出して緻密化する
（処理時間 1 日）、このような 3 段階プロセスにより
CMC を試作し、材料組織観察や高温空气中への曝露
後の残存曲げ強度試験などを行って力学特性や高温耐
久性を評価しています【図 6、図 7】。

近年、日本でもベンチャー企業による再使用型宇宙
機の研究開発が進められており、成果が将来活用され
ることを目指しています。また、例えば廃棄物焼却炉
の炉壁としての利用や、焼却炉用発電用の熱交換器用
材料としての利用も考えられ、地上、空、宇宙での
CMC の活躍を目指しています。

5. おわりに

以上紹介したように、本学では、JAXA との共同研
究を通じて新しい材料を航空機、将来宇宙機に適用し
ていくための研究開発を進めており、新しい材料の適
用に伴う課題を解決するための基礎研究はもちろん、
航空機に使用されるために不可欠となる新しい試験法
や国際規格の準備にも取り組んでいます。また、
JAXA の研究者が客員教授として大学院講義を担当す
るなど、若い皆さんが航空宇宙の最先端分野にチャレ
ンジしていく入口を用意しています。未来の空や宇宙
を切り開く冒険へのご参加をお待ちしています。

